

**Situationsanalyse und Manöverentscheidung
für Fußgängerschutzsysteme mit Längs- und Querführung**

Dissertation

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
Christian Bräuchle
aus Mosbach

Tübingen
2016

Gedruckt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Eberhard Karls Universität Tübingen.

Tag der mündlichen Qualifikation:

22.12.2016

Dekan:

Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel

1. Berichterstatter:

Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. Thomas Kropf

Berichte aus der Informatik

Christian Bräuchle

**Situationsanalyse und Manöverentscheidung
für Fußgängerschutzsysteme mit Längs- und
Querführung**

D 21 (Diss. Universität Tübingen)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Tübingen, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5175-9

ISSN 0945-0807

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Fußgänger stellen im deutschen Unfallgeschehen einen überproportional großen Anteil der getöteten Verkehrsteilnehmer dar. Während Maßnahmen des passiven Fußgängerschutzes im Wesentlichen eine Reduktion der Unfallschwere forcieren, bieten aktive Fußgängerschutzsysteme zusätzlich die Möglichkeit zur Unfallvermeidung. Aus heutigen Fahrzeugmodellen sind Notbremsassistenten bekannt, welche vor einer Kollision automatisch eine Fahrzeugverzögerung einleiten. Abhängig von der Ausgangssituation kann dadurch entweder die Kollision vermieden werden oder durch die Geschwindigkeitsreduktion eine Senkung der Unfallschwere herbeigeführt werden.

Ausweichassistenten können gemäß fahrphysikalischer Betrachtungen und entsprechender Auswertung von Unfalldaten ein zusätzliches Kollisionsvermeidungspotential erreichen. Neben der Durchführung eines automatischen Ausweichmanövers mit entsprechender Fahrdynamikregelung stellt insbesondere die situationsgerechte Manöverentscheidung eine Herausforderung für Fahrerassistenzsysteme dar. Es wird daher eine neue Methodik eingeführt, um auch dann einen optimalen Schutz für Fußgänger zu gewährleisten, wenn sich eine drohende Kollision weder durch eine Notbremsung, noch durch ein Ausweichmanöver, sicher vermeiden lässt. Als Gütekriterium wird das Verletzungsrisiko von Fußgängern für verschiedene Manövervarianten eines Assistenzsystems ausgewertet. Neben Messunsicherheiten wird insbesondere die Unsicherheit von Prädiktionsannahmen bei der Manöverentscheidung berücksichtigt. Modelle zur Beschreibung der Bewegungsmöglichkeiten von Fußgängern sind bereits bekannt, allerdings ist der Einfluss von Fahrerinteraktionen während eines automatischen Ausweichmanövers mit zeitgleicher Notbremsung bisher nicht betrachtet worden und wird in dieser Arbeit quantifiziert. Über eine Probandenstudie im Realfahrzeug wird nachgewiesen, dass der Fahrereinfluss nicht vernachlässigbar ist. Durch

unterschiedliche Gestaltung der Lenkinteraktion können jedoch signifikante Unterschiede der gemessenen Ausweichtrajektorien erreicht werden. Die Differenz zwischen gemessener und geplanter Ausweichbahn wird als Prädiktionsunsicherheit bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Mit der eingeführten Methodik lässt sich identifizieren, in welcher Situation eine bestimmte Manövervariante als optimal betrachtet werden kann.

Als Konzeptnachweis erfolgt eine softwaretechnische Umsetzung, welche über analytische Betrachtungen mit synthetischen Datensätzen verifiziert wird. Mit einer Schnittstelle zur Verwendung von realen Messdaten eines Versuchsfahrzeugs erfolgt eine erste Validierung der eingeführten Manöverentscheidung. Neben dem funktionalen Nachweis wird die Zeitkomplexität der prototypischen Implementierung unter Berücksichtigung von abhängigen Parametern, wie beispielsweise der Prädiktionsschrittweite, bewertet. Anhand des Rechenzeitbedarfs wird aufgezeigt, dass eine Verwendung in heutigen Steuergeräten der Automobilindustrie prinzipiell möglich ist.

Zusammenfassend wurde ein Fußgängerschutzsystem entworfen, welches unter Berücksichtigung von Unsicherheiten ein optimales Notmanöver auswählt. Es wurde gezeigt, dass die Auswertung des Verletzungsrisikos auch dann eine Aussage über die effizienteste Manövervariante zulässt, wenn eine Kollision nicht mit Sicherheit vermeidbar ist. Der Einfluss der Prädiktionsunsicherheit von Fußgängern wurde über bekannte Bewegungsmodelle berücksichtigt. Die Unsicherheit aufgrund der Fahrerinteraktion während einer querdynamischen Manöverausrührung wurde quantifiziert und als nicht vernachlässigbar identifiziert.

Abstract

Pedestrians make up a disproportionately high share of traffic fatalities. Whereas passive safety measures primarily focus on reducing an accident's severity, active safety measures can additionally provide the potential for accident avoidance. Emergency braking assistance is commonly available in modern vehicles enabling automatically initiated vehicle deceleration in the case of an imminent collision. Depending on the situation, such systems are capable of either preventing a collision by stopping the vehicle before collision or lowering the severity of a collision by reducing the impact velocity.

According to vehicle dynamics and accident research, assistance systems with evasive steering can achieve additional collision avoidance potential. Besides the execution of an automatic evasive maneuver along with a corresponding vehicle dynamics control, the challenge of such a driver assistance system is for the system to make an appropriate maneuver decision. In this thesis, a new method is introduced to allow optimal protection for pedestrians, even if a collision cannot be completely avoided by automatic emergency braking or automatic steering intervention. As decision criterion, the injury risk of the oncoming pedestrian is evaluated for several maneuver variants which can be actuated by the driver assistance system. In particular, the uncertainty of prediction assumptions is considered. Existing models describe a pedestrian's motion potential, but the influence of a driver's intervention during automatic evasion maneuvers with simultaneous emergency braking has not been investigated so far and is quantified here.

An end-user study with a prototype vehicle was executed to demonstrate that the influence of driver interaction is not negligible. By testing different designs of steering interventions, significant differences of the measured evasion trajectory were observed.

The difference between the planned and measured driving path during an automatic emergency maneuver is considered as a prediction uncertainty within the decision making. With the introduced method, the optimal maneuver variant can be identified depending on the driving situation.

A software prototype was realized as a proof of concept to verify analytical results with synthetic data sets. To perform a first validation of the introduced maneuver decision algorithm, measurement data from an end-user test at a proving ground was used. Besides the functional confirmation, the time complexity of the software prototype was evaluated considering dependent parameters, for example the step size of prediction. The resulting computation time shows, that an application in current automotive electronic control units is possible.

In summary, a pedestrian protection system which selects an optimal emergency maneuver considering uncertain information was developed. It was shown, that an evaluation of the injury risk enables decision making even if an imminent collision is not definitely avoidable. The influence of a pedestrian's prediction uncertainty was considered using existing motion models. The uncertainty of the driver's interaction during an automatic evasion maneuver was quantified and identified to be not negligible.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand der Vorentwicklung für Fahrerassistenzsysteme der Robert Bosch GmbH in Abstatt.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Wolfgang Rosenstiel, Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät und Professor am Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik der Universität Tübingen für die universitätsseitige Betreuung und die stets konstruktiven und hilfreichen Ideen und Gespräche. Prof. Thomas Kropf, Leiter der Zentralabteilung Systemintegration Kraftfahrzeugtechnik der Robert Bosch GmbH mit Professur an der Universität Tübingen möchte ich für die Übernahme der Zweitbegutachtung danken von der ich sowohl in wissenschaftlicher Hinsicht, als auch bezüglich der Industrierelevanz profitierte.

Dr. Folko Flehmig danke ich für die intensive Betreuung bei der Robert Bosch GmbH während meiner Zeit als Doktorand. Zu Projektbeginn arbeitete er mich in alle relevanten Themenbereiche ein und stellte Kontakte zu Kolleginnen und Kollegen im Projektumfeld her. Im weiteren Verlauf förderten unsere fachlichen Diskussionen stets die Weiterentwicklung der Arbeit und gestalteten den inhaltlichen Rahmen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der Vorentwicklung im Geschäftsbereich Chassis Systems Control für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit. Insbesondere gilt mein Dank Christian Jeschke für die tatkräftige Unterstützung bei der Ausrüstung von Versuchsfahrzeugen und Realisierung der Versuchskonzepte. Auch der regelmäßige Austausch mit Dr. Felix Wulf förderte immer neue Ideen.

Die Kooperation mit den unternehmensinternen Forschungsabteilungen für Fahr sicherheits- und Assistenzsysteme, User Technologies, sowie dem Bereich Unfallfor-

schung hat das Projekt stets vorangetrieben, vielen Dank an alle, die mich unterstützt haben. Besonders danke ich Claus Marberger für seinen Beitrag zur Ausgestaltung der Probandenstudien und Einsatz bei deren Durchführung.

Zur Untersuchung von Teilaspekten des Projekts, insbesondere von regelungstechnischen Problemstellungen und Implementierungen haben studentische Mitarbeiter einen wertvollen Beitrag geleistet. Ich möchte mich an dieser Stelle bei Johannes Rünz, Lenne Ahrens und Benjamin Gerke bedanken, sowie allen Teilnehmenden der Fahrversuchsstudien.

Abschließend danke ich meiner Familie, die meinen persönlichen Werdegang ermöglicht hat, und mich im Promotionsvorhaben in jeder Hinsicht unterstützte.

Yokohama, 2016

Christian Bräuchle

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Vorwort	v
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2 Gliederung der Arbeit	5
2 Stand der Technik	9
2.1 Fußgängerschutz	9
2.1.1 Unfallstatistik	10
2.1.2 Potentiale durch Aktive Sicherheit	12
2.2 Ausweichassistenten	15
2.3 Umfeldsensorik	18
2.4 Verhaltensprädiktion	19
2.4.1 Prädiktion von Fahrzeug und Fahrer	20
2.4.2 Prädiktion von Fußgängern	21
2.5 Situationsanalyse und Kritikalitätsbewertung	22
2.6 Interaktionsplanung	29
2.7 Bewegungsregelung	32
3 Manövervarianten und Aktionsplanung	35
3.1 Definitionen und Formelzeichen	35
3.1.1 Koordinatensysteme	36

3.1.2	Trajektorie	37
3.1.3	Fahrzeugbewegung	37
3.2	Manövertypen zum Fußgängerschutz	40
3.2.1	Referenzmanöver	40
3.2.2	Notbremsmanöver	41
3.2.3	Ausweichmanöver	43
3.2.4	Kombiniertes Brems- und Lenkmanöver	45
3.3	Gütekriterium zur Manöverentscheidung	49
3.3.1	Definition der Gütefunktion	51
3.3.2	Bestimmung der Gütefunktion für kont. Zufallsvariablen	52
3.4	Manöverentscheidung ohne Prädiktionsunsicherheit	53
3.4.1	Einführung am Beispiel des Notbremsmanövers	53
3.4.2	Betrachtung ohne Fußgängerbewegung	55
3.4.3	Betrachtung mit Fußgängerbewegung	58
3.5	Unsicherheitsbehaftete Fußgängerprädiktion	60
3.5.1	Einfluss auf das Gütekriterium	64
3.5.2	Auswirkung auf die Manöverentscheidung	67
3.5.3	Manöverentscheidung für weitere Ausgangssituationen	70
4	Manöverdurchführung und Fahrerverhalten	73
4.1	Untersuchungsziel und Abgrenzung der Studie	74
4.2	Identifikation des Fahrerverhaltens	76
4.2.1	Einflussvariablen und Hypothesen	77
4.2.2	Versuchsbeschreibung	79
4.2.3	Versuchsaufbau	83
4.2.4	Untersuchte Systemausprägungen	89
4.3	Ergebnisse der Versuchsreihe	92
4.3.1	Beschreibung der Stichprobe	93
4.3.2	Szenario 1: True-Positive, begrenzte Spur	94
4.3.3	Szenario 2: True-Positive, unbegrenzte Spur	98
4.3.4	Szenario 3: False-Positive, begrenzte Spur	100
4.3.5	Akzeptanz	103

4.4	Prädiktionsunsicherheit Fahrerinteraktion	104
4.4.1	Längsdynamik: Reaktion am Gaspedal	105
4.4.2	Längsdynamik: Reaktion am Bremspedal	106
4.4.3	Querdynamik: Reaktion am Lenkrad	106
5	Situationsanalyse unter Unsicherheiten	109
5.1	Voraussetzungen und Abgrenzung	110
5.2	Konzeption	110
5.3	Situationsanalyse mit Bayes'schen Netzwerken	112
5.3.1	Bewegungsprädiktion	113
5.3.2	Kritikalitätsanalyse	119
5.3.3	Manöverentscheidung	124
5.4	Realisierung im Funktionsprototyp	126
5.4.1	Fußgängerbewegungsmodell	128
5.4.2	Fahrzeuggesteuerungsmodell	130
5.4.3	Situationsanalyse	131
5.4.4	Kollisionswahrscheinlichkeit	136
5.4.5	Abschätzung der Verletzungsschwere	137
5.4.6	Manöverentscheidung	139
5.4.7	Zeitkomplexität	141
6	Erste Validierung des Funktionsprototyps	147
6.1	Validierungskonzept und Zielsetzung	148
6.2	Synthetische Daten als Vergleich zu Kapitel 3.5	149
6.2.1	Generierung synthetischer Datensätze	150
6.2.2	Betrachtung Kollision links	154
6.2.3	Betrachtung Kollision mittig	156
6.2.4	Betrachtung Kollision rechts	158
6.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	160
6.3	Validierung mit realitätsnahen Messdaten	161
6.3.1	Konzept und Abgrenzung zu Kapitel 4.2	162
6.3.2	Versuchsaufbau	164

6.3.3	Versuchsumsetzung und Stichprobe	166
6.3.4	Optimale Manöver	168
6.3.5	Ergebnisse der Versuchsreihe	171
6.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	173
7	Zusammenfassung	175
A	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	179